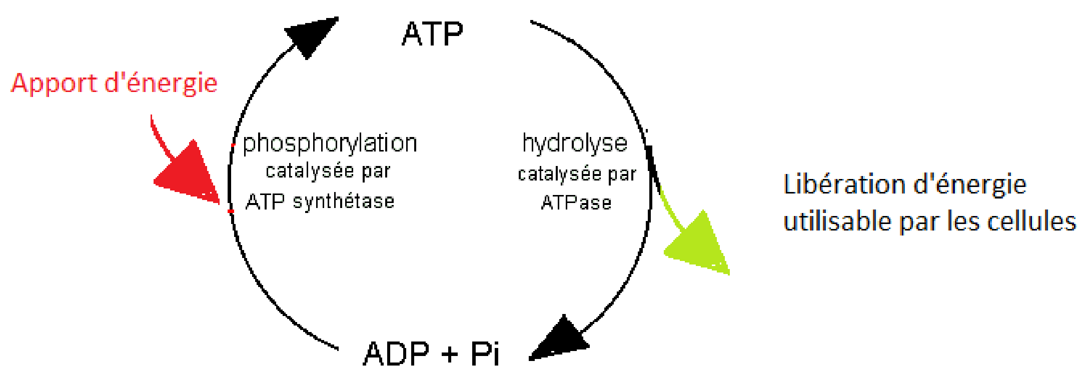
Thème 3 : Corps humain et santé

Partie 2 : Produire le mouvement : contraction musculaire et apport d'énergie.

Chapitre 2 : Origine de l'ATP nécessaire à la contraction de la cellule musculaire.

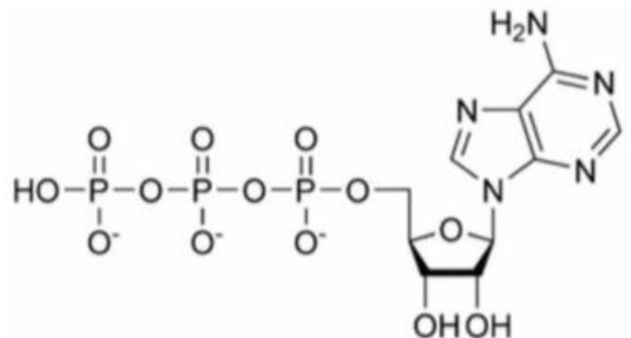
Les cellules ont besoin d'énergie pour assurer leurs fonctions vitales (croissance, déplacement, reproduction, etc.)
L'énergie est apportée par l'hydrolyse d'une molécule, l'ATP, seule forme d'énergie chimique utilisable.



I. L'ATP, une molécule clé du métabolisme énergétique.

L'ATP (adénosine triphosphate), molécule universelle présente dans toutes les cellules, comporte une série de trois groupements phosphate. L'**hydrolyse** de l'ATP produit de l'ADP et un ion phosphate libre (noté Pi). Elle **libère de l'énergie** :





L'énergie libérée par l'hydrolyse de l'ATP varie suivant les conditions du milieu (concentration des autres substances, température, pH etc.). Dans les conditions qui règnent dans les cellules, elle est de l'ordre de 50 kJ. Mol–1. L'énergie libérée est ensuite transférée aux réactions biochimiques qui la consomment. Au repos, une personne hydrolyse environ 45 kg d'ATP par jour. Inversement, la **synthèse** d'ATP **nécessite un apport d'énergie** :



Le muscle dispose-t-il d'une grosse quantité d'ATP ?

L'autonomie énergétique d'un homme de 70 kg	
Réserves totales d'ATP	Énergie nécessaire pour courir un 100 mètres
120 à 180 millimoles	130 KJ

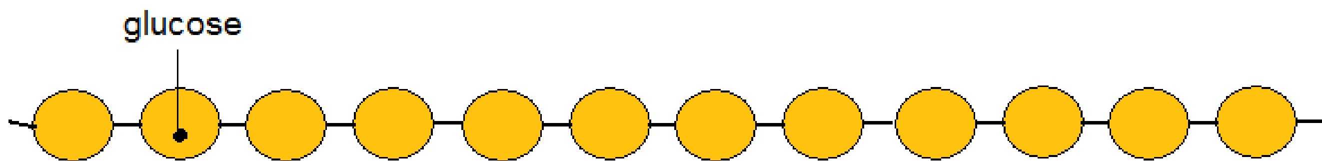
Environ 4 KJ d'autonomie !!! De quoi parcourir 2 ou 3 mètres !!!!!

Comment faire 100m ? Comment s'effectue le renouvellement de l'ATP ?

Quantité de 2 molécules présentes dans le muscle		
	Avant contraction	Après contraction
Glycogène	10,8 g/Kg de muscle	8 g/Kg
ATP	4 à 6 millimoles/Kg de muscle.	4 à 6 millimoles/Kg de muscle.

On en déduit que le muscle « utilise » du glycogène pour renouveler l'ATP.

Qu'est-ce que le glycogène ?



C'est un polymère de glucose. Son hydrolyse pourra donc fournir du glucose utilisable pour produire de l'ATP. Les cellules récupèrent l'énergie contenue dans les molécules organiques (essentiellement le glucose) par 2 grands processus métaboliques :

-La respiration

-La fermentation

Comment obtenir l'énergie nécessaire à la régénération de l'ATP ?

II. Les caractéristiques des voies métaboliques de régénération de l'ATP.

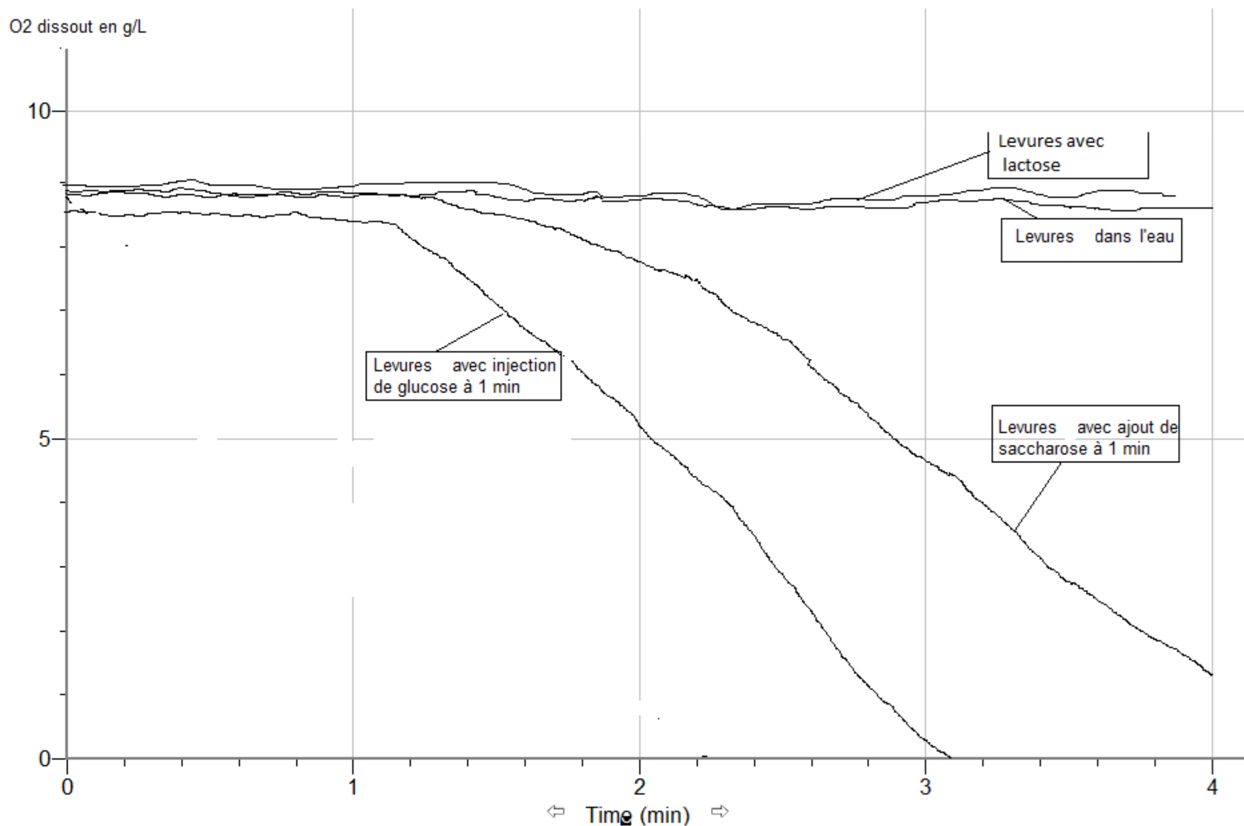
A. La respiration, voie métabolique universelle permettant de récupérer le potentiel énergétique des molécules organiques

Comment démontrer la réalité de l'équation bilan ?

1. La respiration : approche des réactions chimiques qui se réalisent



Les levures sont un matériel de choix car ce sont des organismes unicellulaires. Le phénomène est directement étudié à cette échelle.



On prend des levures affamées car elles ont épuisés leurs réserves.

- **Lien entre consommation d'O_2 et utilisation d'une molécule organique**

Les résultats montrent que la consommation d'O_2 est conditionnée à la présence d'une molécule dégradable. Sans molécule présente, pas de respiration.

Les levures dégradent (oxydent) le glucose et le saccharose mais pas le lactose

La réaction est moins rapide pour le saccharose car la molécule trop volumineuse pour pénétrer dans les cellules est d'abord coupée (hydrolysée) dans le milieu par une enzyme, la saccaharase que la levure sécrète dans le milieu. (voir exercice à faire à la maison).

On peut montrer par des dosages que le glucose disparait au fur et à mesure que les levures respirent.

- **Lien entre respiration et production d'énergie utilisable**

Plusieurs fonctions vitales comme la reproduction nécessitent de l'énergie.

On peut montrer que la respiration est bien productrice d'énergie utilisable en évaluant par exemple le potentiel reproducteur de levures qui respirent et de levures qui ne respirent pas.

- **Lien entre respiration et dégagement de CO_2**

Il suffit de rajouter une sonde qui mesure le dégagement de CO_2 dans le bioréacteur

B. Les fermentations, autres processus métaboliques produisant de l'ATP

Selon les organismes, il peut y avoir plusieurs types de fermentation

1. La réaction de la fermentation alcoolique chez les levures



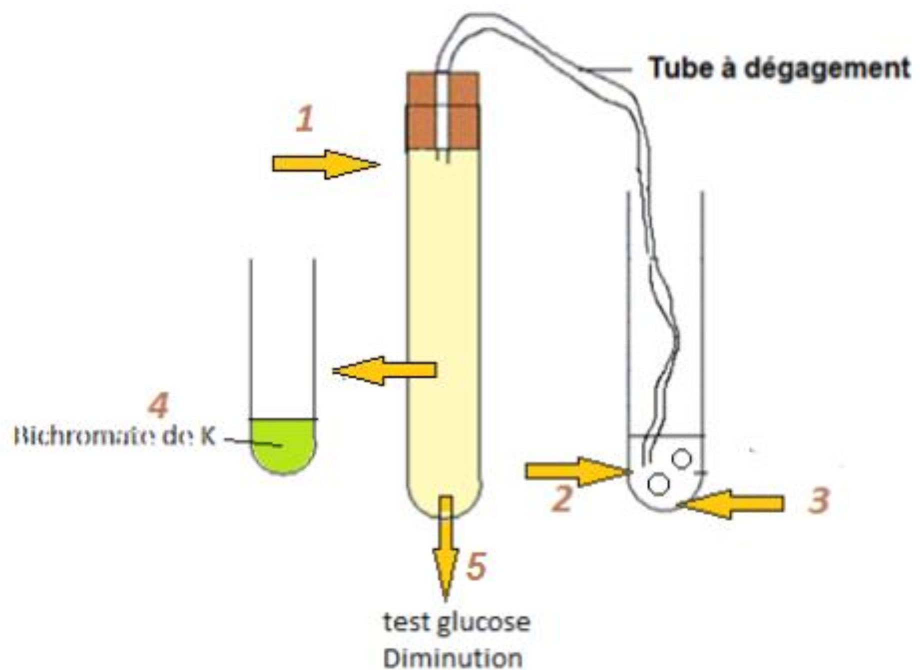
$C_6H_{12}O_6$ (glucose) $\longrightarrow$ 2 C_2H_5OH (éthanol) + 2 CO_2 + Energie utilisable

Comment placer les levures en condition de fermentation et comment montrer qu'elles réalisent alors une fermentation alcoolique ?

Démarche

Les levures peuvent respirer. Il faut donc les empêcher de respirer en les plaçant dans des conditions anaérobies (1)

Pour montrer qu'elles fermentent, il faut montrer qu'elles produisent de l'alcool (4), du CO_2 (3) qui crée une surpression (2), et qu'elles consomment du glucose (5)



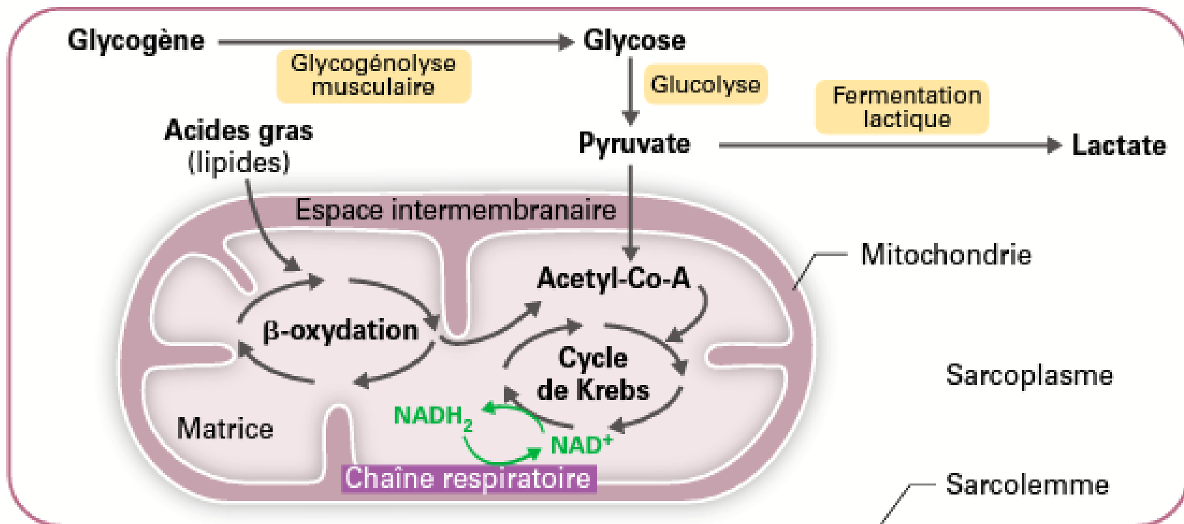
Durant la fermentation, 2 moles d'ATP sont produites.

Le glucose est dégradé en pyruvate (glycolyse). **C'est une oxydation incomplète, puisque les produits finaux contiennent encore de l'énergie chimique, contrairement à la respiration.**

Les composés réduits lors de la glycolyse sont régénérés par réduction d'acide pyruvique en alcool.

2. La fermentation lactique

Elle est réalisée par de nombreux microorganismes qui sont utilisées dans les biotechnologies alimentaires, mais aussi par les cellules musculaires humaines lorsque la disponibilité en O_2 devient insuffisante.



Principales étapes du métabolisme énergétique dans une cellule musculaire.

3. Les rendements comparés des 2 voies métaboliques (respiration et fermentation)

On compare l'énergie chimique potentielle des produits initiaux et finaux de l'équation bilan

Pour la rentabilité réelle, on compare l'énergie des moles d'ATP produites (36 KJ/mole d'ATP) avec l'énergie de la molécule de glucose.

Energie chimique potentielle des produits initiaux en KJ	Energie potentielle des produits finaux	Energie théoriquement disponible pour la synthèse d'ATP	Nombre de moles d'ATP synthétisées par môle de produit initial	Rentabilité réelle : E ATP/E glucosex100
Glucose 2840	CO_2 et eau :0 KJ	2840 KJ	36	100 x36 x 36/2840 = 45%
Glucose 2840	2 éthanols 2360 x 2	120 KJ soit 23 fois moins que la respiration	2	2,5%
Glucose 2840	2 acides lactiques 1200 x 2	440 KJ soit 7 fois moins que la respiration	2	2,5%

La fermentation est une voie métabolique peu rentable.
Ce sont des oxydations incomplètes de la matière organique.

Bilan : L'étude d'une culture de levures permet de caractériser les voies métaboliques de régénération de l'ATP. Les levures utilisent en permanence de l'ATP, notamment pour croître et se multiplier.
Dans un **milieu aérobie** (en présence de dioxygène) les levures **respirent**, alors qu'en **milieu anaérobie** (en absence de dioxygène) elles effectuent la **fermentation alcoolique**. Ce sont deux processus d'oxydation de molécules organiques qui produisent de l'ATP, mais avec des rendements différents. Dans le cas de la molécule de glucose ($C_6H_{12}O_6$), les réactions globales sont les suivantes :
• La **respiration** : $C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2 \rightarrow 6\ CO_2 + 6\ H_2O$
La molécule du glucose est **complètement oxydée** en CO_2 et permet la production de 36 ATP par mole de glucose.
• La **fermentation alcoolique** :
$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2\ C_2H_6O$ (éthanol) + $2\ CO_2$.
• L'**oxydation** de la molécule de glucose est **incomplète** : il y a production d'un composé secondaire organique, ici l'éthanol, et une production de seulement 2 ATP par mole de glucose.

Où s'effectue la respiration cellulaire ? Et comment l'ATP est-il régénéré ?

III. Localisation de la respiration cellulaire et la régénération de l'ATP.

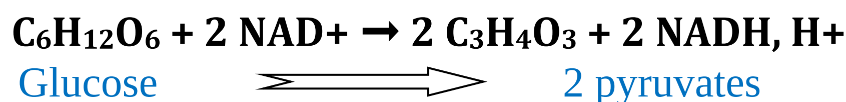
La respiration cellulaire comporte plusieurs étapes.

A. Une première étape, dans le hyaloplasme : la glycolyse

La dégradation d'une molécule de glucose ($C_6H_{12}O_6$) commence dans le hyaloplasme (ou cytosol) des cellules. C'est un ensemble de réactions, appelé **glycolyse**, au cours desquelles :
– le glucose est oxydé en deux molécules d'**acide pyruvique** ($C_3H_4O_3$) ;
– des atomes d'hydrogène du glucose sont pris en charge par des composés NAD+ (Nicotinamide adénine dinucléotide) qui sont alors réduits en NADH, H+.

Le bilan de la glycolyse, s'écrit donc ainsi :

$$C_6H_{12}O_6 + 2\ NAD^+ \rightarrow 2\ C_3H_4O_3 + 2\ NADH, H^+$$



L'énergie libérée par la glycolyse permet de produire **2 molécules d'ATP** pour une molécule de glucose oxydée.
https://www.edumedia-sciences.com/fr/media/326-glycolyse

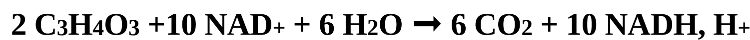
B. Une deuxième étape, dans la matrice des mitochondries : le cycle de Krebs

Les mitochondries sont les organites où se déroule l'essentiel de la respiration cellulaire. Ce sont de petits organites, particulièrement nombreux dans les cellules aux besoins énergétiques importants, comme les fibres musculaires. Une mitochondrie est

limitée par une double membrane, la membrane interne formant des replis appelés **crêtes mitochondriales**, et délimitant un volume interne, la **matrice**.

Dans la matrice mitochondriale, l'acide pyruvique subit une série de réactions constituant un cycle appelé **cycle de Krebs**. Au cours de ces réactions, l'acide pyruvique est totalement dégradé. C'est l'origine du dioxyde de carbone rejeté par la respiration. Cette dégradation produit aussi des électrons et des ions hydrogène, pris en charge par les composants NAD^+. Pour les deux molécules d'acide pyruvique issus de la glycolyse d'une molécule de glucose, il se forme ainsi 6 molécules de CO_2 et 10 NADH, H^+.

Le bilan du cycle de Krebs est donc :



$$2\ C_3H_4O_3 + 10\ NAD^+ + 6\ H_2O \rightarrow 6\ CO_2 + 10\ NADH,\ H^+$$

Ces réactions libèrent de l'énergie permettant de produire **2 molécules d'ATP**.

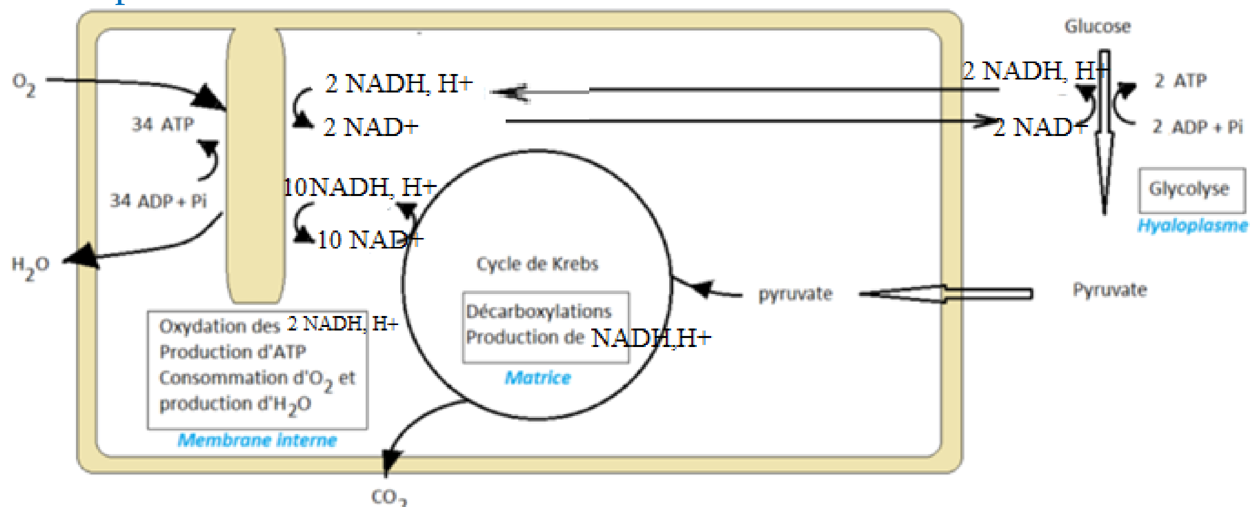
https://www.edumedia-sciences.com/fr/media/566-cycle-de-krebs

C. Une troisième étape, au niveau des crêtes des mitochondries :

Les crêtes mitochondriales sont riches en molécules qui constituent ce qu'on appelle la **chaîne respiratoire mitochondriale**. Il s'agit de diverses molécules enchâssées dans la membrane de la mitochondrie et situées à proximité les unes des autres. Par une série d'oxydoréductions, cet ensemble oxyde les composés NADH, H^+ : les électrons et les ions hydrogène sont transférés jusqu'à un accepteur final qui n'est autre que le **dioxygène**. Ce dernier est alors réduit pour former de l'eau. C'est donc à ce stade, en tant qu'**accepteur final des électrons et de l'hydrogène**, qu'intervient le dioxygène nécessaire à la respiration.

Les réactions d'oxydoréduction de la chaîne respiratoire permettent, pour 12 NADH, H^+ oxydés (deux provenant de la glycolyse et dix du cycle de Krebs), une production de **32 molécules d'ATP**.

À partir d'une molécule de glucose totalement oxydée lors des diverses étapes de la respiration, **36 molécules d'ATP** environ sont produites, pour l'essentiel au niveau de la chaîne respiratoire mitochondriale.



https://www.edumedia-sciences.com/fr/media/488-chaine-respiratoire

Comment les voies métaboliques assurent-elles la contraction musculaire ?

IV. Les voies métaboliques assurant la contraction.

A. Les différentes voies de génération de l'ATP

Les fibres musculaires ont la capacité d'effectuer une **fermentation lactique**. Cette voie métabolique a l'avantage de pouvoir procurer **rapidement** de l'ATP, sans nécessiter d'apport accru en dioxygène. La glycolyse, réalisée à partir de glucose issu des réserves de glycogène produit en effet de l'ATP. Ce mécanisme a cependant un **faible rendement**, car il consomme beaucoup de réserves glucidiques pour une production d'ATP relativement modeste. En outre, l'acide lactique produit par cette fermentation abaisse le pH musculaire, ce qui contribue à la fatigabilité et conduit même à l'épuisement.

La **respiration** est le mécanisme le plus efficace pour produire durablement de l'ATP. L'ensemble des réserves énergétiques de l'organisme, et non celles du muscle seulement, peuvent être mobilisées et **le rendement en ATP est très élevé**. Cependant, cette voie de production d'ATP est limitée par l'approvisionnement des cellules en dioxygène, lui-même soumis aux capacités des appareils respiratoire et circulatoire. On comprend ainsi la nécessité d'une **bonne oxygénation** au cours d'un effort physique. En absence de glycogène, le tissu musculaire lui-même est dégradé et utilisé comme source d'énergie, entraînant la dégradation des fibres musculaires.

B. Le métabolisme des fibres musculaires

Un muscle squelettique renferme des **fibres musculaires spécialisées** dans des efforts de nature différente :

– **des fibres lentes, de type I** (fibres rouges) riches en mitochondries, d'une puissance modérée, mais très résistantes à la fatigue. Leur voie principale de régénération de l'ATP est la respiration. Ces fibres sont sollicitées lors d'exercices d'endurance.

– **des fibres rapides, de type II** (fibres blanches) pauvres en mitochondries, très puissantes mais peu résistantes à la fatigue. Elles régénèrent l'ATP principalement par **fermentation lactique**. Elles sont sollicitées pour des exercices intenses de courte durée.

Au cours d'un exercice, les faibles réserves d'ATP instantanément mobilisées permettent de réaliser immédiatement le travail musculaire. **Selon l'intensité et la durée de l'exercice**, la fermentation lactique puis la respiration prennent le relais, permettant le maintien du travail musculaire. Le muscle adapte donc son métabolisme au type d'effort.

Comment l'entraînement peut-il modifier le muscle ?

V. L’adaptabilité du muscle squelettique aux pratiques sportives.

A. La plasticité du muscle à l’entraînement

Les muscles s’adaptent continuellement à des changements d’activité par un **remodelage** de leur phénotype. La proportion des types de fibres I ou II composant les muscles, génétiquement déterminée, est différente selon les individus. Des études tendent à montrer qu’un **entraînement physique** ciblé peut cependant modifier cette proportion des fibres et produire des remaniements dans la structure et le métabolisme des cellules musculaires.

Par exemple, un entraînement d’endurance recrute spécifiquement les fibres de type I et quelques fibres de type II. Il augmente à la fois le calibre des fibres musculaires, la densité des capillaires sanguins et le nombre des mitochondries. Il stimule l’expression des gènes codant pour les enzymes impliquées dans la glycolyse et le cycle de Krebs, améliorant ainsi le métabolisme respiratoire. Ces modifications, qui ont lieu au sein des muscles, combinées avec les adaptations des systèmes cardiaque et respiratoire, améliorent la performance et l’endurance.

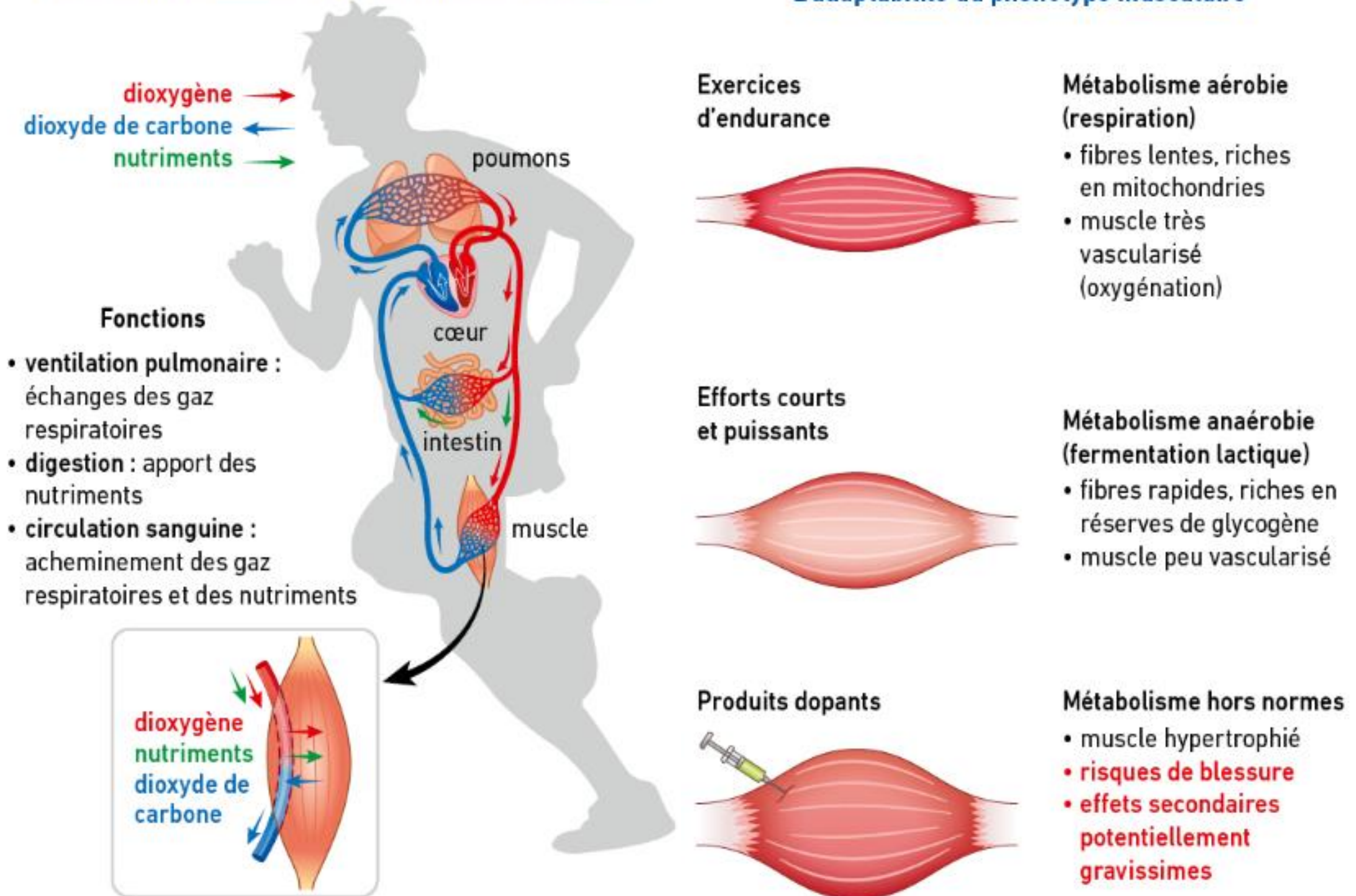
B. Les effets de certaines substances exogènes

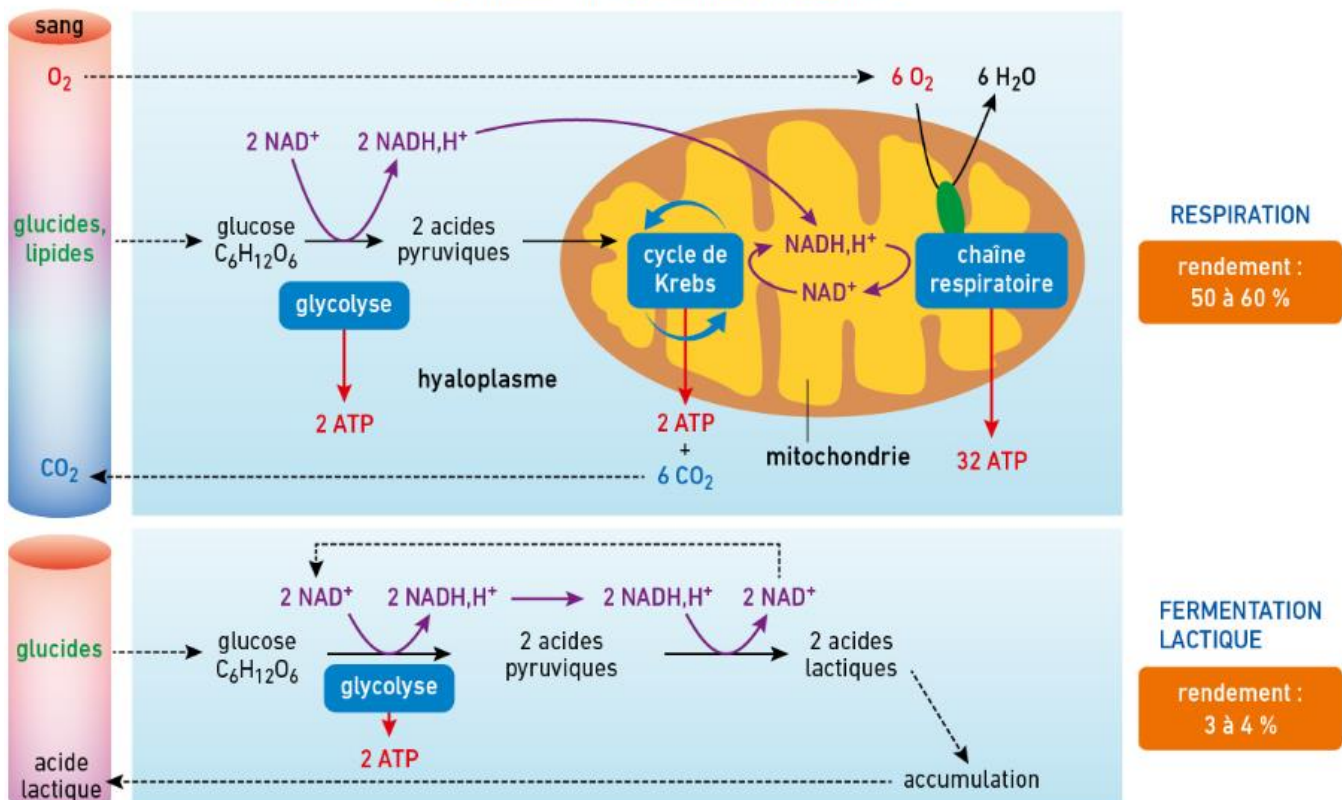
Afin d’améliorer leurs performances, certains sportifs ont recours au **dopage**. Ils détournent de leur usage médical des molécules comme les **stéroïdes anabolisants** qui sont des dérivés de la testostérone. Pris à forte dose, ces produits augmentent la masse et la force musculaire. L’augmentation de la masse musculaire induite par la testostérone est associée à une hypertrophie des fibres musculaires et non à une augmentation de leur nombre. En fusionnant avec des cellules souches satellites, les fibres musculaires synthétisent davantage de protéines musculaires ce qui entraîne leur hypertrophie.

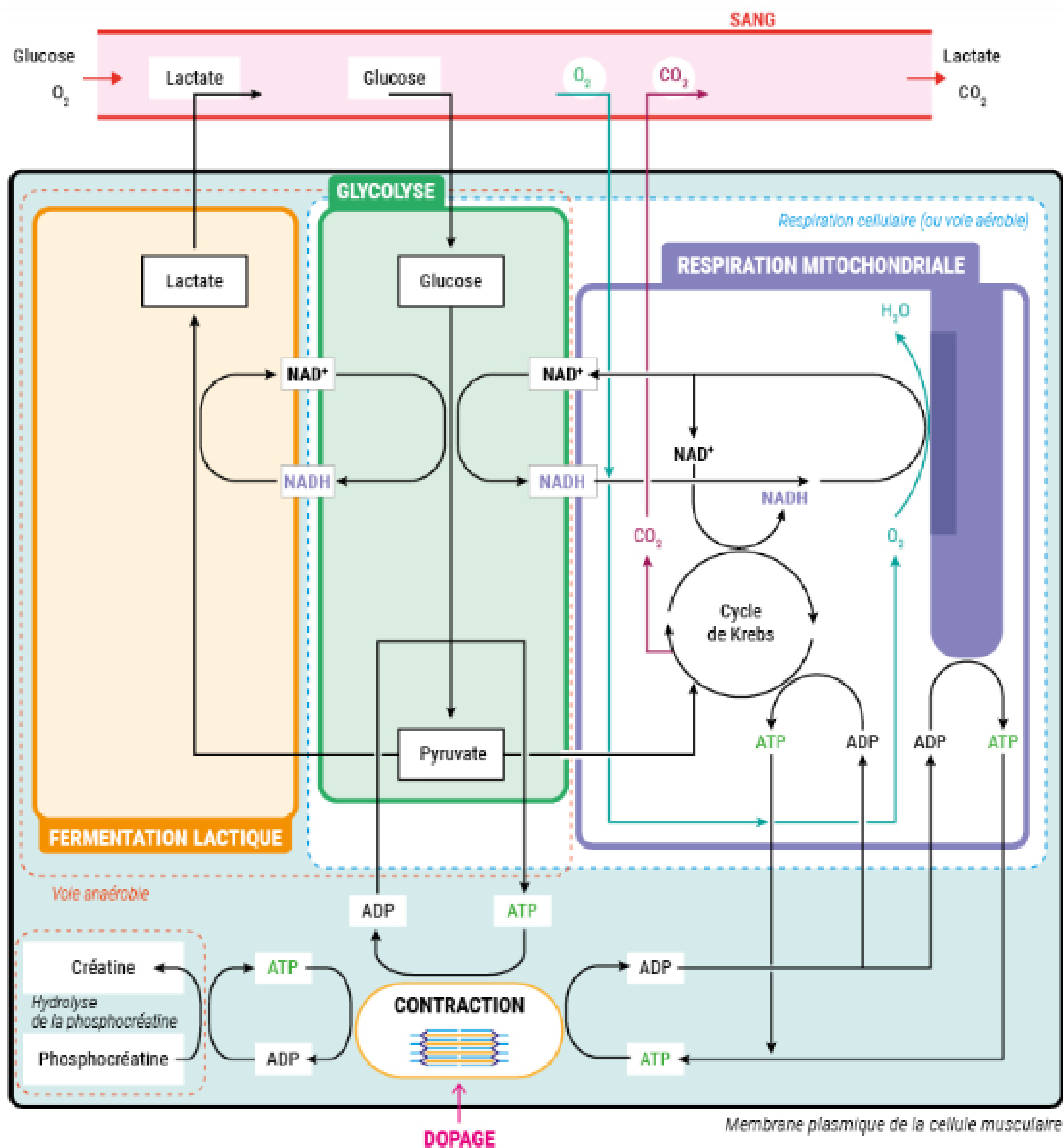
Malheureusement, outre l’acte de tricherie qu’il constitue, le dopage a des **effets secondaires catastrophiques**. Il peut entraîner à court terme des lésions musculaires et tendineuses et à long terme cancers, stérilité, voire masculinisation du corps pour les athlètes féminines.

Les effets du dopage : https://www.youtube.com/watch?v=XpgWFW_12w0

L'origine de l'ATP nécessaire à la contraction musculaire







L'origine de l'ATP dans la cellule musculaire

